

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-157973

(43)Date of publication of application : 12.06.2001

(51)Int.Cl.

B25J 5/00

A63H 11/00

B25J 13/00

(21)Application number : 2000-206531

(71)Applicant : SONY CORP  
YAMAGUCHI JINICHI

(22)Date of filing : 07.07.2000

(72)Inventor : KUROKI YOSHIHIRO  
ISHIDA KENZO  
YAMAGUCHI JINICHI

(30)Priority

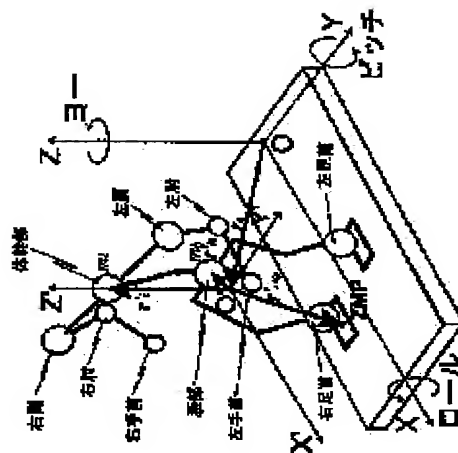
Priority number : 11266134 Priority date : 20.09.1999 Priority country : JP

(54) WALK CONTROL DEVICE, AND WALK CONTROL METHOD FOR ROBOT

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To compensate or recover attitude stability lost for emotion expressing actions using the body or hands.

SOLUTION: A total body motion pattern to realize stable walk is obtained by introducing a lower back motion pattern based on a desired foot part motion pattern, a ZMP orbit, a body trunk motion pattern, and an arm motion pattern. A walking mode of a leg is determined to make stable walk in any action condition of a robot including standing straight without loving, or walking. When action of the body or hands using the upper part of its body is applied when it is standing straight without moving, the walking mode of the legs is determined to make stable walk in accordance with the walking mode of the upper part of the body.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

25.10.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the  
examiner's decision of rejection or application  
converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3443077

[Date of registration]

20.06.2003

[Number of appeal against examiner's decision of

rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許番号

特許第3443077号  
(P3443077)

(45) 発行日 平成15年 9 月 2 日 (2003. 9. 2)

(24) 登録日 平成15年 6 月 20 日 (2003. 6. 20)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

B 2 5 J 5/00

B 2 5 J 5/00

F

A 6 3 H 11/00

A 6 3 H 11/00

Z

B 2 5 J 13/00

B 2 5 J 13/00

Z

請求項の数28(全 18 頁)

(21) 出願番号 特願2000-206531(P2000-206531)  
(22) 出願日 平成12年 7 月 7 日 (2000. 7. 7)  
(65) 公開番号 特開2001-157973(P2001-157973A)  
(43) 公開日 平成13年 6 月 12 日 (2001. 6. 12)  
審査請求日 平成14年 10 月 25 日 (2002. 10. 25)  
(31) 優先権主張番号 特願平11-266134  
(32) 優先日 平成11年 9 月 20 日 (1999. 9. 20)  
(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(73) 特許権者 000002185  
ソニー株式会社  
東京都品川区北品川 6 丁目 7 番35号  
(73) 特許権者 599133381  
山口 仁一  
東京都日野市多摩平 5 -14-38  
(72) 発明者 黒木 義博  
東京都品川区北品川 6 丁目 7 番35号 ソ  
ニー株式会社内  
(72) 発明者 石田 健蔵  
東京都品川区北品川 6 丁目 7 番35号 ソ  
ニー株式会社内  
(74) 代理人 100101801  
弁理士 山田 英治 (外 2 名)

審査官 所村 美和

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ロボットの運動パターン生成装置及び運動パターン生成方法、並びにロボット

1

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターン生成装置であって、上肢運動パターンと、任意の足部運動パターン、ZMP軌道、体幹運動パターンのいずれか又は全部に基づいて、腰部運動パターンを導出することにより所望の全身運動パターンを得る、ことを特徴とするロボットの運動パターン生成装置。

【請求項 2】 少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、ZMPが目標位置に入るように前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターン生成装置であって、

(a) 所望の動作を実現するための足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さを設定する手段と、

2

(b) 前記手段 (a) により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段と、

(c) 前記手段 (a) 及び前記手段 (b) により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の解を求める手段と、

(d) 腰部運動の解に基づいて所望の全身運動パターンを生成する手段と、を具備することを特徴とするロボットの運動パターン生成装置。

10 【請求項 3】 少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、ZMPが目標位置に入るように前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターン生成装置であって、

(A) 要求された動作を実現するための足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さを設定する手段

と、

(B) 前記手段(A)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段と、

(C) 前記ロボットの非厳密モデルを用いて、前記手段(B)により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の近似解を求める手段と、

(D) 前記ロボットの厳密モデルを用いて、前記手段(B)により設定されたZMP上のモーメントを前記手段(C)により求められた前記腰部運動の近似解を用いて求める手段と、

(E) 前記手段(D)により求められた前記モーメントが、所定の許容値未満であれば腰部運動の解とする手段と、

(F) 前記手段(D)により求められた前記モーメントが、所定の許容値以上であれば、設定ZMP上における非厳密モデルのモーメントを修正して、前記手段(C)に再投入する手段と、

(G) 腰部運動の解に基づいて所望の全身運動パターンを生成する手段と、  
を具備することを特徴とするロボットの運動パターン生成装置。

【請求項4】前記非厳密モデルは前記ロボットに関する線形及び／又は非干渉の多質点近似モデルであり、前記厳密モデルは前記ロボットに関する剛体モデル、又は、非線形及び／又は干渉の多質点近似モデルであることを特徴とする請求項3に記載のロボットの運動パターン生成装置。

【請求項5】さらに、

(C') 前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段(C)において求めた近似解では予め設定した体幹・上肢運動が実現できない場合に、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行う手段、  
を備えることを特徴とする請求項3に記載のロボットの運動パターン生成装置。

【請求項6】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段(C)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントと、腰部の水平面内運動によって生じる設定ZMP上のモーメントとの釣合方程式を解くことによって腰部運動の近似解を求める、  
ことを特徴とする請求項3に記載のロボットの運動パターン生成装置。

【請求項7】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段(C)は、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算することを特徴とする請求項3に記載のロボットの運動パターン生成装置。

【請求項8】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段(C)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用するとともに、腰部の水平面内運動に

フーリエ級数展開を適用して、腰部水平面内軌道のフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって腰部運動の近似解を求める、  
ことを特徴とする請求項3に記載のロボットの運動パターン生成装置。

【請求項9】上体の動作を表現するための複数の関節を備えた上半身と、少なくとも歩行動作を実現するための脚部の関節を備えた下半身とからなる2足歩行型ロボットのための歩行制御装置であって、予め設定した上半身の歩容に応じて、安定歩行できるような下半身の歩容を決定することを特徴とするロボットの運動パターン生成装置。

【請求項10】少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターンの生成方法であって、少なくとも上肢運動パターンと、足部運動パターン、ZMP軌道、体幹運動パターンのいずれか又は全部に基づいて腰部運動パターンを導出することにより歩行時の全身運動パターンを得ることを特徴とするロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項11】少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、ZMPが目標位置に入るように下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターンの生成方法であって、

(a) 所望の動作を実現するための足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さを設定するステップと、

(b) 前記ステップ(a)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定するステップと、

(c) 前記ステップ(a)及び前記ステップ(b)により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の解を求めるステップと、

(d) 腰部運動の解に基づいて所望の全身運動パターンを生成するステップと、を具備することを特徴とするロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項12】少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、ZMPが目標位置に入るように下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターンの生成方法であって、

(A) 要求された動作を実現するための足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さを設定するステップと、

(B) 前記ステップ(A)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定するステップと、

(C) 前記ロボットの非厳密モデルを用いて、前記ステップ(B)により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の近似解を求めるステップと、

(D) 前記ロボットの厳密モデルを用いて、前記ステップ(B)により設定されたZMP上のモーメントを前記手段(C)により求められた前記腰部の近似解を用いて

求めるステップと、

(E) 前記ステップ(D)により求められたモーメントが、所定の許容値未満であれば腰部運動の解とするステップと、

(F) 前記ステップ(D)により求められたモーメントが、所定の許容値以上であれば、設定ZMP上における非厳密モデルのモーメントを修正して、前記ステップ(C)に再投入するステップと、

(G) 腰部運動の解に基づいて所望の全身運動パターンを生成するステップと、を具備することを特徴とするロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項13】前記非厳密モデルは前記ロボットに関する線形及び／又は非干渉の多質点近似モデルであり、前記厳密モデルは前記ロボットに関する剛体モデル、又は、非線形及び／又は干渉の多質点近似モデルである、ことを特徴とする請求項12に記載のロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項14】さらに、

(C') 前記非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求めるステップ(C)において求めた近似解では予め設定した体幹・上肢運動が実現できない場合に、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行うステップ、を備えることを特徴とする請求項12に記載のロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項15】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求めるステップ(C)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントと、腰部の水平面内運動によって生じる設定ZMP上のモーメントとの釣合方程式を解くことによって腰部運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項12に記載のロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項16】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求めるステップ(C)は、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算することを特徴とする請求項12に記載のロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項17】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求めるステップ(C)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用するとともに、腰部の水平面内運動にフーリエ級数展開を適用して、腰部水平面内軌道のフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって腰部運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項12に記載のロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項18】上体の動作を表現するための複数の関節を備えた上半身と、少なくとも歩行動作を実現するための脚部の関節を備えた下半身とからなる2足歩行型ロボットのための歩行制御方法であって、予め設定した上半身の歩容に応じて、安定歩行できるような下半身の歩容

を決定することを特徴とするロボットの運動パターンの生成方法。

【請求項19】少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの全身運動パターン生成方法であって、少なくとも上肢運動パターンと、任意の足部運動パターン、ZMP軌道、体幹部運動パターンのいずれか又は全部に基づいて、腰部運動パターンを導出することにより所望の全身運動パターンを得る、ことを特徴とするロボットの全身運動パターン生成方法。

【請求項20】少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットであって、少なくとも上肢運動パターンと、任意の足部運動パターン、ZMP軌道、体幹部運動パターンのいずれか又は全部に基づいて、腰部運動パターンを導出することにより所望の全身運動パターンを得る、ことを特徴とするロボット。

【請求項21】少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターン生成装置を有するロボットであって、前記運動パターン生成装置は、上肢運動パターンと、任意の足部運動パターン、ZMP軌道、体幹運動パターンのいずれか又は全部に基づいて、腰部運動パターンを導出することにより所望の全身運動パターンを得る、ことを特徴とするロボット。

【請求項22】少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、ZMPが目標位置に入るように前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターン生成装置を有するロボットであって、前記運動パターン生成装置は、

(a) 所望の動作を実現するための足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さを設定する手段と、

(b) 前記手段(a)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段と、

(c) 前記手段(a)及び前記手段(b)により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の解を求める手段と、

(d) 腰部運動の解に基づいて所望の全身運動パターンを生成する手段と、を具備することを特徴とするロボット。

【請求項23】少なくとも上肢、下肢、足部、体幹部及び腰部で構成され、ZMPが目標位置に入るように前記下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの運動パターン生成装置を有するロボットであって、前記運動パターン生成装置は、

(A) 要求された動作を実現するための足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さを設定する手段と、

(B) 前記手段(A)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段と、

(C) 前記ロボットの非厳密モデルを用いて、前記手段(B)により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の近似解を求める手段と、

(D) 前記ロボットの厳密モデルを用いて、前記手段(B)により設定されたZMP上のモーメントを前記手段(C)により求められた前記腰部運動の近似解を用いて求める手段と、

(E) 前記手段(D)により求められた前記モーメントが、所定の許容値未満であれば腰部運動の解とする手段と、

(F) 前記手段(D)により求められた前記モーメントが、所定の許容値以上であれば、設定ZMP上における非厳密モデルのモーメントを修正して、前記手段(C)に再投入する手段と、

(G) 腰部運動の解に基づいて所望の全身運動パターンを生成する手段と、

を具備することを特徴とするロボット。  
【請求項24】前記非厳密モデルは前記ロボットに関する線形及び／又は非干渉の多質点近似モデルであり、前記厳密モデルは前記ロボットに関する剛体モデル、又は、非線形及び／又は干渉の多質点近似モデルである、ことを特徴とする請求項23に記載のロボット。

【請求項25】さらに、

(C') 前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段(C)において求めた近似解では予め設定した体幹・上肢運動が実現できない場合に、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行う手段、を備えることを特徴とする請求項23に記載のロボット。

【請求項26】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段(C)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントと、腰部の水平面内運動によって生じる設定ZMP上のモーメントとの釣合方程式を解くことによって腰部運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項23に記載のロボット。

【請求項27】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段(C)は、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算することを特徴とする請求項23に記載のロボット。

【請求項28】前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段(C)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用するとともに、腰部の水平面内運動にフーリエ級数展開を適用して、腰部水平面内軌道のフ

ーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって腰部運動の近似解を求める、ことを特徴とする請求項23に記載のロボット。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、生体のメカニズムや動作を模した構造を有するリアリスティックなロボットのための歩行制御装置及び歩行制御方法に係り、特に、例えばヒトやサルなどの直立歩行型の身体メカニズムや動作を模した構造を有する脚式移動型ロボットのための歩行制御装置及び歩行制御方法に関する。

【0002】更に詳しくは、本発明は、2足直立歩行による脚式移動を行うとともに脚部の上には胴体や頭部、腕などのいわゆる上半身が搭載されてなる直立歩行・脚式移動型ロボットのための歩行制御装置及び歩行制御方法に係り、特に、ヒトに近い自然な動作や豊かな表現力を維持しながら2足による安定歩行を実現するロボットのための歩行制御装置及び歩行制御方法に関する。

【0003】

【従来の技術】電氣的若しくは磁氣的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置のことを「ロボット」という。ロボットの語源は、スラブ語の"ROBOT" (奴隷機械) に由来すると言われている。わが国においてロボットが普及し始めたのは1960年代末からであるが、その多くは、工場における生産作業の自動化・無人化などを目的としたマニピュレータや搬送ロボットなどの産業用ロボット(industrial robot)であった。

【0004】最近では、ヒトやサルなどの2足直立歩行を行う動物の身体メカニズムや動作を模した脚式移動ロボットに関する研究開発が進展し、実用化への期待も高まってきている。2足直立による脚式移動は、階段の昇降や障害物の乗り越え等、柔軟な走行動作を実現できる点で優れている。

【0005】脚式移動ロボットは、直立する五体全てを装備した形態ではなく、要素技術としての下肢部分のみによる脚式移動に関する研究からスタートしたという歴史的経緯がある。

【0006】例えば、特開平3-184782号公報には、脚式歩行ロボットのうち、胴体より下に相当する構造体に適用される関節構造について開示している。

【0007】また、特開平5-305579号公報には、脚式移動ロボットの歩行制御装置について開示している。同公報に記載の歩行制御装置は、ZMP (Zero Moment Point) すなわち歩行するときの床反力によるモーメントがゼロとなる床面上の点を目標値に一致させるように制御するものである。但し、同公報に記載の図1を見ても判るように、モーメントを作用する胴体24はブラックボックス化されており、五体全てが完成した状態ではなく、要素技術としての脚式移動の提案にとどま

る。

【0008】しかしながら、脚式移動ロボットの究極目的は、言うまでもなく、五体を完備した構造体の完成である。すなわち、2足歩行を行う下肢と、胴体や頭部、腕などからなる上肢と、これら下肢と上肢を連結する体幹部とで構成された構造体で2足による直立歩行を行うことにある。五体が完成したロボットは、2足を用いた直立・脚式移動作業を前提とし、人間の住空間上での作業の各場面において、上肢、下肢、及び体幹部を所定の優先順位に従って協調動作するように制御する必要がある。

【0009】特に、ヒトのメカニズムや動作をエミュレートした脚式移動ロボットのことを「人間形」、若しくは「人間型」のロボット(humanoid robot)と呼ぶ。人間型ロボットは、例えば、生活支援、すなわち住環境その他の日常生活上の様々な場面における人的活動の支援などを行うことができる。

【0010】脚式移動ロボットは、旧来同様の産業目的のものと、エンターテインメント目的のものとに大別することができる。

【0011】前者の産業目的のロボットは、産業活動・生産活動等における各種の難作業をヒトに代行して実現することを意図する。その一例は、原子力発電プラントや火力発電プラント、石油化学プラントにおけるメンテナンス作業、製造工場や高層ビルにおけるような危険作業・難作業の代行である。この種のロボットは、産業上の特定の用途若しくは機能を実現することが設計・製作上の至上の主題であり、2足歩行を前提とはするものの、ヒトやサルなど直立歩行動物が本来持つ身体メカニズムや動作メカニズムを機械装置として忠実に再現する必要は必ずしもない。例えば、特定用途を実現するために手先など特定の部位の自由度や動作機能を強化する一方で、用途には比較的關係が低いとされる頭部や腰部などの自由度を制限し又は省略するといった設計上の便宜が施される。この結果、2足歩行と謂えども、ロボットの作業や動作の外観上で不自然さが残ることがあるが、かかる点は妥協せざるを得ない。

【0012】これに対し、後者のエンターテインメント目的の脚式移動ロボットは、難作業を代行するという生活支援というよりも、生活そのものに密着した性質を持つ。すなわち、この種のロボットは、ヒトやサルなどの2足の直立歩行を行う動物が本来持つメカニズムを忠実に再現し、その自然に円滑な動作を実現することを至上の目的とする。また、エンターテインメント・ロボットは、ヒトやサルなどの知性の高い直立動物をエミュレートする以上、表現力が豊かであることが望ましい。この意味において、ヒトを模したエンターテインメント・ロボットは、まさに「人間型ロボット」と呼ぶに相応しい。

【0013】要するに、ひとえに脚式移動ロボットとい

っても、エンターテインメント目的のロボットは、産業目的のロボットとは要素技術を共有する反面、究極目標やこれを実現するためのハードウェア・メカニズム、動作の制御方法やソフトウェア構成は全く異なると言っても過言ではない。

【0014】既に周知のように、人体は数百の関節すなわち数百に上る自由度を備えている。限りなくヒトに近い動作を脚式移動ロボットに付与するためには、ほぼ同じ自由度を与えることが好ましいが、これは技術的には極めて困難である。何故ならば、1つの自由度に対して少なくとも各1つのアクチュエータを配設する必要があるが、数百のアクチュエータをロボットという機械装置上に実装することは、製造コストの点からも、重量やサイズなど設計の観点からも不可能に等しい。また、自由度が多いと、その分だけ位置・動作制御やバランス制御等のための計算量が指数関数的に増大してしまう。

【0015】以上を要言すれば、人間型ロボットは、制限された自由度を用いて人体メカニズムをエミュレートしなければならない。エンターテインメント目的のロボットの場合、さらに、人体よりもはるかに少ない自由度を用いてよりヒトに近い自然な動作や、表現力豊かな動作を実現しなければならないという要件が課される訳である。

【0016】また、2足直立歩行を行う脚式移動ロボットは、柔軟な走行動作(例えば階段の昇降や障害物の乗り越え等)を実現できる点で優れている反面、重心位置が高くなるため、その分だけ姿勢制御や安定歩行制御が難しくなる。特に、エンターテインメント・タイプのロボットの場合、ヒトやサルなどの知性動物における自然な動作や感情を豊かに表現しながら姿勢や安定歩行を制御しなければならない。

【0017】

【発明が解決しようとする課題】ところで、ヒトやサルにおける動作上の「表現力」を考えた場合、腕や胴体などの上体の動きや姿勢は、作業の実現だけでなく、感情の表現という側面があり、非常に重要な意味を持つ。これが「身振り」、「手振り」と呼ばれる所以である。

【0018】日常生活において、身振りや手振りは、下半身の停止不動状態、歩行やその他下半身の可動状態のいずれの期間中も行われる。また、身振りや手振りにより、身体全体の重心位置は大幅に移動し、慣性モーメントが発生する。ヒトやサルなど現実の動物は、自律的に重心バランスやモーメントを補償して、停止状態や歩行状態を正常に維持する動作を自ずと行うように造られている。

【0019】他方、人間型ロボットにおいては表現力が豊かであることが重要課題であり(前述)、当然にして身振りや手振りは欠かせない。したがって、身振りや手振りという上半身主導の動作に対して適応的な姿勢制御や安定歩行制御が必要となってくる。

【0020】2足歩行による脚式移動を行うタイプのロボットに関する姿勢制御や安定歩行に関する技術は、当業界において既に数多提案されている。しかしながら、これら従来の提案の多くは、ZMP (Zero Moment Point)、すなわち歩行するときの床反力によるモーメントがゼロとなる床面上の点を目標値に一致させるように適応的に制御する方式である。

【0021】例えば、特開平5-305579号公報に記載の脚式移動ロボットは、ZMPがゼロとなる床面上の点を目標値に一致させるようにして安定歩行を行うようになっている。

【0022】また、特開平5-305581号公報に記載の脚式移動ロボットは、ZMPが支持多面体(多角形)内部、又は、着地、離床時にZMPが支持多面体(多角形)の端部から少なくとも所定の余裕を有する位置にあるように構成した。この結果、外乱などを受けても所定距離だけZMPの余裕があり、歩行の安定性の向上を図ることができる。

【0023】また、特開平5-305583号公報には、脚式移動ロボットの歩き速度をZMP目標位置によって制御する点について開示している。すなわち、同公報に記載の脚式移動ロボットは、予め設定された歩行パターン・データを用い、ZMPを目標位置に一致させるように脚部関節を駆動するとともに、上体の傾斜を検出してその検出値に応じて設定された歩行パターン・データの吐き出し速度を変更するようにしている。この結果、予期しない凹凸を踏んでロボットが例えば前傾するときは吐き出し速度を速めることで姿勢を回復できる。またZMPが目標位置に制御できるので、両脚支持期において吐き出し速度を変更しても支障がない。

【0024】また、特開平5-305585号公報には、脚式移動ロボットの着地位置をZMP目標位置によって制御する点について開示している。すなわち、同公報に記載の脚式移動ロボットは、ZMP目標位置と実測位置とのずれを検出して、それを解消する様に脚部の一方または双方を駆動するか、又は、ZMP目標位置まわりにモーメントを検出してそれが零になる様に脚部を駆動することで安定歩行を行うようになっている。

【0025】また、特開平5-305586号公報には、脚式移動ロボットの傾斜姿勢をZMP目標位置によって制御する点について開示している。すなわち、同公報に記載の脚式移動ロボットは、ZMP目標位置まわりのモーメントを検出し、モーメントが生じているときは、それが零になるように脚部を駆動することで安定歩行を行うようになっている。

【0026】また、例えば、「2足歩行ロボット資料集」(改訂第2版)文部省科学研究費・総合研究(A)「2足歩行ロボットの歩行と制御の研究」研究グループ(昭和61年2月)、及び「上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発」(第6回知能

移動ロボットシンポジウム、1992年5月21日、22日)などには、少なくとも上体に駆動できる上体関節を備えるとともに、上体に連結される脚部に複数の関節を供え、該脚部関節を駆動して歩行するタイプの脚式移動ロボットにおいて、上体の歩容を脚部の歩容に基づいて決定する(すなわち脚式動作による姿勢不安定を上体の歩容で補う)という点が開示されている。

【0027】すなわち、上記に挙げた技術は総じて、上半身主導の動作を考慮した姿勢制御や安定歩行制御を行うものではない。上記の技術は、2足歩行の脚式移動ロボットの歩行中に、外乱などのために歩行継続が困難となった場合に、上半身の歩容(時間的な動き)を変更して歩行の安定性を回復するものである。すなわち、下半身主導の動作中に、外乱による不安定を補償するために上半身の歩容を変更するものであり、言い換えれば上半身による表現力を犠牲にしていることに他ならない。また、上記の各公報に記載された脚式移動ロボットは、いずれも身振りや手振りなど上半身主導の感情表現動作のために失われた安定姿勢を回復させるものではない。

【0028】本発明は、上述したような技術的課題を勘案したものであり、その目的は、生体のメカニズムや動作を模した構造を有するリアリスティックなロボットのための、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することにある。

【0029】本発明の更なる目的は、例えばヒトやサルなどの直立歩行型の身体メカニズムや動作を模した構造を有する脚式移動型ロボットのための、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することにある。

【0030】本発明の更なる目的は、2足直立歩行による脚式移動を行うとともに脚部の上には胴体や頭部、腕などのいわゆる上半身が搭載されてなる直立歩行・脚式移動型ロボットのための、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することにある。

【0031】本発明の更なる目的は、ヒトに近い自然な動作や豊かな表現力を維持しながら安定歩行を実現するロボットのための、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することにある。

【0032】本発明の更なる目的は、2足直立歩行による脚式移動を行うとともに脚部の上には胴体や頭部、腕などのいわゆる上半身が搭載されてなるロボットにおいて、身振りや手振りなど上半身主導の感情表現動作のために失われた姿勢安定性を補償若しくは回復させることができる、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することにある。

【0033】本発明の更なる目的は、上半身の歩容に応じて安定歩行できるような下半身の歩容を決定することができる、2足直立歩行型ロボットのための優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することにある(「歩容」とは、当業界において「関節角度の時系列変化」を意味する技術用語であり、「運動パターン」と略同義で



ある)。

【0034】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記課題を参照してなされたものであり、その第1の側面は、少なくとも下肢と体幹部と腰部で構成され、下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法であって、任意の足部運動パターン、ZMP軌道、体幹運動パターン、上肢運動パターンに基づいて腰部運動パターンを導出することにより歩行時の全身運動パターンを得ることを特徴とするロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法である。

【0035】また、本発明の第2の側面は、少なくとも下肢と体幹部と腰部で構成され、ZMPが目標位置に入るように下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法であって、(a)要求された動作を実現するための足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さを設定する手段又はステップと、(b)前記手段又はステップ(a)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段又はステップと、(c)前記手段又はステップ(b)により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の解を求める手段又はステップと、(d)腰部運動の解に基づいて腰部運動を実行する手段又はステップと、を具備することを特徴とするロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法である。

【0036】また、本発明の第3の側面は、少なくとも下肢と体幹部と腰部で構成され、ZMPが目標位置に入るように下肢による脚式移動を行うタイプのロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法であって、(A)要求された動作を実現するための足部運動、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢及び高さを設定する手段又はステップと、(B)前記手段又はステップ(A)により設定された足部運動に基づいてZMP軌道を設定する手段又はステップと、(C)前記ロボットの非厳密モデルを用いて、前記手段又はステップ(B)により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の近似解を求める手段又はステップと、(D)前記ロボットの厳密モデルを用いて、前記手段又はステップ(B)により設定されたZMP上でモーメントが釣り合う腰部運動の近似解を求める手段又はステップと、(E)前記手段又はステップ(C)、及び、手段又はステップ(D)の各近似解の差が所定の許容値未満であれば腰部運動の解とする手段又はステップと、(F)前記手段又はステップ(C)、及び、手段又はステップ(D)の各近似解の差が所定の許容値以上であれば、設定ZMP上における非厳密モデルのモーメントを修正して、前記手段(C)に再投入する手段又はステップと、(G)腰部運動の解に基づいて腰部運動を実行する手段又はステップと、を具備することを特徴とするロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法である。

【0037】本発明の第3の側面に係るロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法において、前記非厳密モデルは、例えば、前記ロボットに関する線形及び／又は非干渉の多質点近似モデルである。また、前記厳密モデルは、例えば、前記ロボットに関する剛体モデル、又は、非線形及び／又は干渉の多質点近似モデルでよい。このような近似モデルを利用することにより、歩行制御のための計算量を大幅に削減することができる。

【0038】また、本発明の第3の側面に係るロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法は、さらに、(C')前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段又はステップ(C)において求めた近似解では予め設定した体幹・上肢運動が実現できない場合に、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行う手段又はステップを具備していてもよい。

【0039】また、本発明の第3の側面に係るロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法において、前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段又はステップ(C)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントと、腰部の水平面内運動によって生じる設定ZMP上のモーメントとの釣合方程式を解くことによって腰部運動の近似解を求めるようにしてもよい。

【0040】あるいは、前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段又はステップ(C)は、時間の関数を周波数の関数に置き換えて計算するようにしてもよい。

【0041】あるいは、前記の非厳密モデルを用いて腰部運動の近似解を求める手段又はステップ(C)は、足部運動、体幹運動、上肢運動によって生じる設定ZMP上のモーメントにフーリエ級数展開を適用するとともに、腰部の水平面内運動にフーリエ級数展開を適用して、腰部水平面内軌道のフーリエ係数を算出して、さらに逆フーリエ級数展開を適用することによって腰部運動の近似解を求めるようにしてもよい。

【0042】また、本発明の第4の側面は、上体の動作を表現するための複数の関節を備えた上半身と、少なくとも歩行動作を実現するための脚部の関節を備えた下半身とからなる歩行型ロボットのための歩行制御装置又は歩行制御方法であって、上半身の歩容に応じて、安定歩行できるような下半身の歩容を決定することを特徴とするロボットの歩行制御装置又は歩行制御方法である。

【0043】

【作用】本発明に係るロボットの歩行制御装置及び歩行制御方法によれば、足部運動の他に、体幹運動や上肢運動の設定に基づいて安定歩行可能な腰部運動を実現することができる。体幹運動や上肢運動とは、身振りや手振りなどのロボットの上半身を用いた表現動作すなわち上半身の歩容に相当する。

【0044】すなわち、ロボットが直立不動時や普通歩

行時など様々な動作状態であっても、安定歩行を実現できるように下肢の歩容を決定することができる。特に、直立不動時に上体すなわち上肢と体幹を用いた身振り・手振りの動作をロボットに印加した場合には、かかる上体の歩容に応じて、安定歩行できるような（すなわち上体の歩容のために失われたバランスを補うような）下肢の歩容を決定することができると言える。

【0045】本発明のさらに他の目的、特徴や利点は、後述する本発明の実施例や添付する図面に基づくより詳細な説明によって明らかになるであろう。

【0046】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照しながら本発明の実施例を詳解する。

【0047】図1及び図2には本発明の実施に供される人間型ロボット100を前方及び後方の各々から眺望した様子を示している。さらに、図3には、この人間型ロボット100が具備する関節自由度構成を模式的に示している。

【0048】図3に示すように、人間型ロボット100は、2本の腕部と頭部1を含む上肢と、移動動作を実現する2本の脚部からなる下肢と、上肢と下肢とを連結する体幹部とで構成される。

【0049】頭部1を支持する首関節は、首関節ヨー軸2と、首関節ピッチ軸3と、首関節ロール軸4という3自由度を有している。

【0050】また、各腕部は、肩関節ピッチ軸8と、肩関節ロール軸9と、上腕ヨー軸10と、肘関節ピッチ軸11と、前腕ヨー軸12と、手首関節ピッチ軸13と、手首関節ロール軸14と、手部15とで構成される。手部15は、実際には、複数本の指を含む多関節・多自由度構造体である。但し、手部15の動作はロボット100の姿勢制御や歩行制御に対する寄与や影響が少ないので、本明細書ではゼロ自由度と仮定する。したがって、各腕部は7自由度を有するとする。

【0051】また、体幹部は、体幹ピッチ軸5と、体幹ロール軸6と、体幹ヨー軸7という3自由度を有する。

【0052】また、下肢を構成する各々の脚部は、股関節ヨー軸16と、股関節ピッチ軸17と、股関節ロール軸18と、膝関節ピッチ軸19と、足首関節ピッチ軸20と、足首関節ロール軸21と、足部22とで構成される。本明細書中では、股関節ピッチ軸17と股関節ロール軸18の交点は、本実施例に係るロボット100の股関節位置を定義する。人体の足部22は実際には多関節・多自由度の足底を含んだ構造体であるが、本実施例に係る人間型ロボット100の足底はゼロ自由度とする。したがって、各脚部は6自由度で構成される。

【0053】以上を総括すれば、本実施例に係る人間型ロボット100全体としては、合計で $3+7\times 2+3+6\times 2=32$ 自由度を有することになる。但し、エンターテインメント向けの人間型ロボット100が必ずしも

32自由度に限定される訳ではない。設計・製作上の制約条件や要求仕様等に応じて、自由度すなわち関節数を適宜増減することができることは言うまでもない。

【0054】上述したような人間型ロボット100が持つ各自由度は、実際にはアクチュエータを用いて実装される。外観上で余分な膨らみを排してヒトの自然体形状に近似させること、2足歩行という不安定構造体に対して姿勢制御を行うことなどの要請から、アクチュエータは小型且つ軽量であることが好ましい。本実施例では、ギア直結型で且つサーボ制御系をワンチップ化してモータ・ユニットに内蔵したタイプの小型ACサーボ・アクチュエータを搭載することとした。なお、この種のACサーボ・アクチュエータに関しては、例えば本出願人に既に譲渡されている特願平11-33386号明細書に開示されている。

【0055】図4には、人間型ロボット100の制御システム構成を模式的に示している。同図に示すように、人間型ロボット100は、ヒトの四肢を表現した各機構ユニット30、40、50R/L、60R/Lと、各機構ユニット間の協調動作を実現するための適応制御を行う制御ユニット80とで構成される（但し、R及びLの各々は、右及び左の各々を示す接尾辞である。以下同様）。

【0056】人間型ロボット100全体の動作は、制御ユニット80によって統括的に制御される。制御ユニット80は、CPU（Central Processing Unit）やメモリ等の主要回路コンポーネント（図示しない）で構成される主制御部81と、電源回路やロボット100の各構成要素とのデータやコマンドの授受を行うインターフェース（いずれも図示しない）などを含んだ周辺回路82とで構成される。

【0057】本発明を実現する上で、この制御ユニット80の設置場所は特に限定されない。図4では体幹部ユニット40に搭載されているが、頭部ユニット30に搭載してもよい。あるいは、ロボット100外に制御ユニット80を配備して、ロボット100本体とは有線若しくは無線で通信するようにしてもよい。

【0058】図3に示したロボット100内の各関節自由度は、それぞれに対応するアクチュエータによって実現される。すなわち、頭部ユニット30には、首関節ヨー軸2、首関節ピッチ軸3、首関節ロール軸4の各々を表現する首関節ヨー軸アクチュエータA<sub>2</sub>、首関節ピッチ軸アクチュエータA<sub>3</sub>、首関節ロール軸アクチュエータA<sub>4</sub>が配設されている。

【0059】また、体幹部ユニット40には、体幹ピッチ軸5、体幹ロール軸6、体幹ヨー軸7の各々を表現する体幹ピッチ軸アクチュエータA<sub>5</sub>、体幹ロール軸アクチュエータA<sub>6</sub>、体幹ヨー軸アクチュエータA<sub>7</sub>が配備されている。

【0060】また、腕部ユニット50R/Lは、上腕ユ

ニット51R/Lと、肘関節ユニット52R/Lと、前腕ユニット53R/Lに細分化されるが、肩関節ピッチ軸8、肩関節ロール軸9、上腕ヨー軸10、肘関節ピッチ軸11、肘関節ロール軸12、手首関節ピッチ軸13、手首関節ロール軸14の各々を表現する肩関節ピッチ軸アクチュエータ $A_8$ 、肩関節ロール軸アクチュエータ $A_9$ 、上腕ヨー軸アクチュエータ $A_{10}$ 、肘関節ピッチ軸アクチュエータ $A_{11}$ 、肘関節ロール軸アクチュエータ $A_{12}$ 、手首関節ピッチ軸アクチュエータ $A_{13}$ 、手首関節ロール軸アクチュエータ $A_{14}$ が配備されている。

【0061】また、脚部ユニット60R/Lは、大腿部ユニット61R/Lと、膝ユニット62R/Lと、脛部ユニット63R/Lに細分化されるが、股関節ヨー軸16、股関節ピッチ軸17、股関節ロール軸18、膝関節ピッチ軸19、足首関節ピッチ軸20、足首関節ロール軸21の各々を表現する股関節ヨー軸アクチュエータ $A_{16}$ 、股関節ピッチ軸アクチュエータ $A_{17}$ 、股関節ロール軸アクチュエータ $A_{18}$ 、膝関節ピッチ軸アクチュエータ $A_{19}$ 、足首関節ピッチ軸アクチュエータ $A_{20}$ 、足首関節ロール軸アクチュエータ $A_{21}$ が配備されている。

【0062】各関節に用いられるアクチュエータ $A_2$ 、 $A_3$ …は、より好ましくは、ギア直結型で且つサーボ制御系をワンチップ化してモータ・ユニット内に搭載したタイプの小型ACサーボ・アクチュエータ（前述）である。

【0063】頭部ユニット30、体幹部ユニット40、腕部ユニット50、各脚部ユニット60などの各機構ユニット毎に、アクチュエータ駆動制御用の副制御部35、45、55、65が配備されている。さらに、各脚部60R、Lの足底が着床したか否かを検出する接地確認センサ91及び92を装着するとともに、体幹部ユニット40内には、姿勢を計測する姿勢センサ93を装備している。

【0064】主制御部80は、各センサ91～93の出力に応答して副制御部35、45、55、65に対して適応的な制御を行い、人間型ロボット100の上肢、体幹、及び下肢の協調した動作を実現する。主制御部81は、ユーザ・コマンド等に従って、足部運動、ZMP（Zero Moment Point）軌道、体幹運動、上肢運動、腰部高さなどを設定するとともに、これらの設定内容に従った動作を指示するコマンドを各副制御部35、45、55、65に転送する。そして、各々の副制御部35、45…では、主制御部81からの受信コマンドを解釈して、各アクチュエータ $A_2$ 、 $A_3$ …に対して駆動制御信号を出力する。ここで言う「ZMP」とは、歩行中の床反力によるモーメントがゼロとなる床面上の点のことであり、また、「ZMP軌道」とは、例えばロボット100の歩行動作期間中にZMPが動く軌跡を意味する。

【0065】本実施例では、物理的には図3に示す多関節自由度構成を具備する人間型ロボット100を、さら

に多質点近似モデルに置き換えて歩行制御の演算処理を行うようになっている。現実の人間型ロボット100は、無限のすなわち連続的な質点の集合体であるが、有限数で離散的な質点からなる近似モデルに置き換えることによって、計算量を削減することが主な目的である。

【0066】図5には、本実施例に係る歩行制御の計算のために導入される、人間型ロボット100の線形且つ非干渉の多質点近似モデルを図解している。

【0067】図5において、O-XYZ座標系は絶対座標系におけるロール、ピッチ、ヨー各軸を表し、また、O'-X'Y'Z'座標系はロボット100とともに動く運動座標系におけるロール、ピッチ、ヨー各軸を表している。同図に示す多質点モデルでは、 $i$ は $i$ 番目に与えられた質点を表す添え字であり、 $m_i$ は $i$ 番目の質点の質量、 $r'_i$ は $i$ 番目の質点の位置ベクトル（但し運動座標系）を表すものとする。また、後述する腰部運動制御において特に重要な腰部質点の質量は $m_h$ 、その位置ベクトルは $r'_h$ （ $r'_{hx}$ 、 $r'_{hy}$ 、 $r'_{hz}$ ）とし、また、ZMPの位置ベクトルを $r'_{zmp}$ とする。

【0068】図5に示す非厳密の多質点近似モデルにおいては、モーメント式は線形方程式の形式で記述され、該モーメント式はピッチ軸及びロール軸に関して干渉しない、という点を充分理解されたい。

【0069】このような多質点近似モデルは、概ね以下の処理手順により生成することができる。

【0070】（1）ロボット100全体の質量分布を求める。

（2）質点を設定する。質点の設定方法は、設計者のマニュアル入力であっても、所定の規則に従った自動生成のいずれでも構わない。

（3）各領域 $i$ 毎に、重心を求め、その重心位置と質量 $m_i$ を該当する質点に付与する。

（4）各質点 $m_i$ を、質点位置 $r_i$ を中心とし、その質量に比例した半径に持つ球体として表示する。

（5）現実に関連関係のある質点すなわち球体同士を連結する。

【0071】多質点モデルは、言わば、ワイヤフレーム・モデルの形態でロボットを表現したものである。本実施例では、図5を見ても判るように、この多質点近似モデルは、両肩、両肘、両手首、体幹、腰部、及び、両足首の各々を質点として設定したものである。

【0072】なお、図5に示す多質点モデルの腰部情報における各回転角（ $\theta_{hx}$ 、 $\theta_{hy}$ 、 $\theta_{hz}$ ）は、人間型ロボット100における腰部の姿勢すなわちロール、ピッチ、ヨー軸の回転を規定するものである（図8には、多質点モデルの腰部周辺の拡大図を示しているの、確認されたい）。

【0073】次いで、本実施例に係る人間型ロボット100における歩行制御の処理手順について説明する。

【0074】ロボットは、通常、動作する前に予め生成

された運動パターンに従って各関節すなわちアクチュエータを駆動制御することによって、所定の動作を実現するようになっている。本実施例に係るロボット100の場合、任意の足部運動パターン、ZMP軌道、体幹運動パターン、上肢運動パターン等に基づいて、安定歩行を可能とする腰部運動パターンを生成するようになっている。ここで言うZMP (Zero Moment Point) 軌道とは、歩行ロボットにおいて、足底(若しくは足裏)をある一点で床面に固定したとき、歩行動作中にモーメントが発生しないような点のことを言う(前述)。

【0075】本実施例のように片足が6自由度を持つ2足歩行型ロボット(図3を参照のこと)の場合、各足部2R/Lの位置と腰部の水平位置及び高さによって両脚の姿勢が一意に定まる。したがって、腰部運動パター

$m_h$ :腰部質点の質量

$\vec{r}_h(r'_{hx}, r'_{hy}, r'_{hz})$ :腰部質点の位置ベクトル

$m_i$ :i番目の質点の質量

$\vec{r}_i$ :i番目の質点の位置ベクトル

$\vec{r}_{zmp}$ :ZMPの位置ベクトル

$\vec{g}(g_x, g_y, g_z)$ :重力加速度ベクトル

O'-X'Y'Z':運動座標系(ロボットとともに動く)

O-XYZ:絶対座標系

$H = \vec{r}_{hz} + r_{qz}$

【0078】また、ロボット100の腰部高さが一定( $r'_{hz} + r_{qz} = \text{const}$ )で、且つ、膝部質点がゼロであることを前提とする。

【0079】該処理手順は、ロボット100の歩行や身振り・手振りなどの動作を指示する旨のユーザ・コマンド等の入力に回答して開始する。ユーザ・コマンドが指示するロボット100の動作は、例えば、直立不動時の上肢と体幹を用いた身振り・手振り、2足による普通歩行時、2足歩行時における上肢と体幹を用いた身振り・手振りなど、様々である。

【0080】かかるユーザ・コマンドは、主制御部81において解釈され、足部(より具体的には足底)運動、足部運動から導出されるZMP軌道、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢や高さなど、各部の駆動・動作を実際に決定するためのパターンが設定される(ステップS11)。より具体的には、まず足部運動パターン、次いでZMP軌道、体幹運動パターン、そして上肢運動パターンを設定する。また、腰部の運動に関しては、Z'方向のみ設定し、X'及びY'の各方向については未知とす

10

※ンを生成することは、脚の姿勢すなわち下肢の「歩容」を決定することに他ならない(「歩容」とは、当業界において「関節角度の時系列変化」を意味する技術用語であり、「運動パターン」と略同義である)。

【0076】図6には、本実施例に係るロボット100において安定歩行可能な腰部運動を制御するための処理手順をフローチャートの形式で示している。但し、以下では、図5に示すような線形・非干渉多質点近似モデルを用いてロボット100の各関節位置や動作を記述するものとし、且つ、計算に際し以下のようなパラメータを用いることとする。但し、ダッシュ(´)付きの記号は運動座標系を記述するものと理解されたい。

【0077】

【数1】

※る。

【0081】次に、線形・非干渉多質点近似モデルを用いて、足部、体幹、そして上肢運動により発生する設定ZMP上でのピッチ軸、ロール軸まわりの各モーメント( $M_x$ ,  $M_y$ )を算出する(ステップS12)。

【0082】次いで、線形・非干渉多質点近似モデルを用いて、腰部水平面内運動( $r'_{hx}$ ,  $r'_{hy}$ )によって発生する設定ZMP上でのモーメントを算出する(ステップS13)。

【0083】次いで、設定ZMP上におけるモーメントに関する釣り合い式を、ロボットとともに動く運動座標系O'-X'Y'Z'上で導出する(ステップS14)。より具体的には、足部、体幹、そして上肢運動により発生するモーメント( $M_x$ ,  $M_y$ )を既知変数の項として右辺に、腰部質点の水平運動に関する項( $r'_{hx}$ ,  $r'_{hy}$ )を未知変数の項として左辺にまとめ、下式に示すような線形・非干渉なZMP方程式(1)を導出する。

【0084】

【数2】

$$\begin{aligned} &+ m_h H(\ddot{r}_{hx} + \ddot{r}_{qx} + g_x) - m_h g_z (\dot{r}_{hx} - \dot{r}_{zmpx}) = -M_y(t) \\ &- m_h H(\ddot{r}_{hy} + \ddot{r}_{qy} + g_y) + m_h g_z (\dot{r}_{hy} - \dot{r}_{zmpy}) = -M_x(t) \end{aligned} \quad \dots (1)$$

【0085】但し、以下が成立するものとする。

【数3】

【0086】

$$\ddot{r}_{hz} = 0$$

$$\dot{r}_{hz} + r_{qz} = \text{const} \quad (\text{時間に関し一定})$$

【0087】次いで、上記のZMP方程式(1)を解いて、腰部水平面内軌道を算出する(ステップS15)。例えば、オイラー法やルンゲ・クッタ法などの数値的解法(周知)を用いてZMP方程式(1)を解くことで、未知変数としての腰部の水平絶対位置( $r_{hx}$ ,  $r_{hy}$ )の数値解を求めることができる(ステップS16)。ここで求められる数値解は、安定歩行可能な腰部運動パターンの近似解であり、より具体的にはZMPが目標位置に入るような腰部水平絶対位置である。ZMP目標位置は、通常、着床した足底に設定される。

【0088】算出された近似解上では予め設定した体幹・上肢運動が実現できない場合には、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行う(ステップS17)。この際、膝部の軌道を算出してもよい。

【0089】次いで、上述のようにして得られた全身運動パターンを代入して、厳密モデル(すなわち、剛体、若しくは非常に多くの質点からなるロボット100の精密なモデル)における設定ZMP上のモーメント( $eM_x$ ,  $eM_y$ )を算出する(ステップS18)。非厳密モデルでは上記の「数3」が成立することを前提としたが、厳密モデルではかかる前提を要しない(すなわち時間の変化に対して一定である必要はない)。

【0090】厳密モデルにおけるモーメント( $eM_x$ ,  $eM_y$ )は、腰部運動の発生するモーメント誤差である。続くステップS19では、このモーメント( $eM_x$ ,  $eM_y$ )が非厳密モデルにおける近似モーメントの許容値( $\varepsilon M_x$ ,  $\varepsilon M_y$ )未満か否かを判定する。許容値 $\varepsilon$ 未満であれば、腰部安定運動パターンの厳密解及び安定歩行を実現できる全身運動パターンを得ることができたことを意味するので(ステップS20)、本処理ルーチン全体を終了する。

【0091】他方、厳密モデルにおけるモーメント( $eM_x$ ,  $eM_y$ )が近似モデルにおけるモーメントの許容値( $\varepsilon M_x$ ,  $\varepsilon M_y$ )以上であった場合には、厳密モデルにおけるモーメント( $eM_x$ ,  $eM_y$ )を用いて近似モデルにおける既知発生モーメント( $M_x$ ,  $M_y$ )を修正して(ステップS21)、再びZMP方程式の導出を行う。そして、許容値 $\varepsilon$ 未満に収束するまで、上述したような腰部運動パターンの近似解の算出と修正を繰り返して実行する。

【0092】要するに、図6に示す処理手順によれば、足部運動の他に、体幹運動や上肢運動の設定に基づいて安定歩行可能な腰部運動を実現することができる訳である。体幹運動や上肢運動とは、身振りや手振りなどのロボット100の上半身を用いた表現動作すなわち上半身の歩容に相当する。また、片足6自由度からなる2足歩行型のロボット100(図3を参照のこと)の場合、各

足部22R/Lの位置と腰部の水平位置と高さで、脚の姿勢すなわち下肢の「歩容」が一意に定まるので、腰部運動パターンを生成することは下肢の「歩容」を決定することを意味する。

【0093】したがって、本実施例に係る2足直立歩行型のロボット100によれば、直立不動時や普通歩行時など様々な動作状態であっても、安定歩行を実現できるように下肢の歩容を決定することができる、と換言することができる。

【0094】特に、直立不動時に上体すなわち上肢と体幹を用いた身振り・手振りの動作をロボット100に印加した場合には、かかる上体の歩容に応じて、安定歩行できるような(すなわち上体の歩容に伴うアンバランスを補うような)下肢の歩容を決定することができる。すなわち、身振りや手振りなど上半身主導の感情表現動作のために失われた姿勢安定性を、腰の水平位置で定義される下肢の歩容によって好適に補償若しくは回復させることができる、という訳である。

【0095】また、図7には、本実施例に係るロボット100において安定歩行可能な腰部運動を制御する処理手順の他の例をフローチャートの形式で示している。但し、上述と同様に、線形・非干渉多質点近似モデルを用いてロボット100の各関節位置や動作を記述するものとする。

【0096】該処理手順は、ロボット100の歩行や身振り・手振りなどの動作を指示する旨のユーザ・コマンド等の入力に回答して開始する。ユーザ・コマンドが指示するロボット100の動作は、例えば、直立不動時の上肢と体幹を用いた身振り・手振り、2足による普通歩行時、2足歩行時における上肢と体幹を用いた身振り・手振りなど、様々である。

【0097】かかるユーザ・コマンドは、主制御部81において解釈され、足部(より具体的には足底)運動、足部運動から導出されるZMP軌道、体幹運動、上肢運動、腰部の姿勢や高さなど、各部の駆動・動作を実際に決定するためのパターンが設定される(ステップS31)。より具体的には、まず足部運動パターン、次いでZMP軌道、体幹運動パターン、そして上肢運動パターンを設定する。また、腰部の運動に関しては、Z'方向のみ設定し、X'及びY'の各方向については未知とする。

【0098】次に、線形・非干渉多質点近似モデル(前述及び図5を参照のこと)を用いて、足部、体幹、そして上肢運動により発生する設定ZMP上でのピッチ軸、ロール軸まわりの各モーメント( $M_x$ ,  $M_y$ )を算出する(ステップS32)。

【0099】次いで、腰部水平面内運動( $r'_{hx}$ ,  $r'_{hy}$ )をフーリエ級数展開する(ステップS33)。当業界において既に周知のように、フーリエ級数展開することにより、時間軸成分を周波数成分に置き換えて演

算することができる。すなわち、この場合には腰部の動きを周期的な動きとして捉えることができる。また、FFT（高速フーリエ変換）を適用することができるので、計算速度を大幅に向上させることができる。

【0100】次いで、設定ZMP上でのピッチ軸、ロール軸まわりの各モーメント（ $M_x$ 、 $M_y$ ）についてもフーリエ級数展開する（ステップS34）。

【0101】次いで、腰部水平面内軌道のフーリエ係数を算出し、さらに逆フーリエ級数展開することで（ステップS35）、腰部運動の近似解が求まる（ステップS36）。ここで求められる近似解は、安定歩行可能な腰部運動パターンを規定する腰部の水平絶対位置の近似解（ $r_{hx}$ 、 $r_{hy}$ ）であり、より具体的にはZMPが目標位置に入るような腰部水平絶対位置である。ZMP目標位置は、通常、着床した足底に設定される。

【0102】算出された近似解上では予め設定した体幹・上肢運動が実現できない場合には、体幹・上肢運動パターンの再設定・修正を行う（ステップS37）。この際、膝部の軌道を算出してよい。

【0103】次いで、上述のようにして得られた全身運動パターンを代入して、厳密モデル（すなわち、剛体、若しくは非常に多くの質点からなるロボット100の精密なモデル）における設定ZMP上のモーメント（ $eM_x$ 、 $eM_y$ ）を算出する（ステップS38）。非厳密モデルでは上記の「数3」が成立することを前提としたが、厳密モデルではかかる前提を要しない（すなわち時間の変化に対して一定である必要はない）。

【0104】厳密モデルにおけるモーメント（ $eM_x$ 、 $eM_y$ ）は、腰部運動の発生するモーメント誤差である。続くステップS39では、このモーメント（ $eM_x$ 、 $eM_y$ ）が近似モデルにおけるモーメントの許容値（ $\varepsilon M_x$ 、 $\varepsilon M_y$ ）未満か否かを判定する。許容値 $\varepsilon$ 未満であれば、腰部安定運動パターンの厳密解及び安定歩行を実現できる全身運動パターンを得ることができたことを意味するので（ステップS40）、本処理ルーチン全体を終了する。

【0105】他方、厳密モデルにおけるモーメント（ $eM_x$ 、 $eM_y$ ）が近似モデルにおけるモーメントの許容値（ $\varepsilon M_x$ 、 $\varepsilon M_y$ ）以上であった場合には、厳密モデルにおけるモーメント（ $eM_x$ 、 $eM_y$ ）を用いて非厳密モデルにおける既知発生モーメント（ $M_x$ 、 $M_y$ ）を修正して（ステップS41）、再びフーリエ級数展開して、許容値 $\varepsilon$ 未満に収束するまで、上述したような腰部運動パターンの近似解の算出と修正を繰り返し実行する。

【0106】当業者であれば、図7に示す処理手順によっても体幹運動や上肢運動の設定に基づいて安定歩行可能な腰部運動を実現することができる、ということを理解できるであろう。特に、ZMP方程式の数値的解法に頼らず、フーリエ級数展開を用いることで、周期運動を

高速に求めると同時に、FFT（高速フーリエ変換）を適用することでモーメント計算そのものを高速化することができる。

【0107】体幹運動や上肢運動とは、身振りや手振りなどのロボットの上半身を用いた表現動作すなわち上半身の歩容に相当する。また、片足が6個の関節自由度の2足歩行型ロボット100（図3を参照のこと）の場合、各足部22R/Lの位置と腰部の高さで脚の姿勢が一意に定まるので、腰部運動パターンを生成することは、脚の姿勢すなわち下肢の「歩容」を決定することを意味する（前述）。

【0108】したがって、本実施例に係る2足直立歩行型のロボット100によれば、直立不動時や普通歩行時など様々な動作状態であっても、安定歩行を実現できるように下肢の歩容を決定することができる、と換言することができる。

【0109】特に、直立不動時に上体すなわち上肢と体幹を用いた身振り・手振りの動作を印加した場合には、かかる上体の歩容に応じて、安定歩行できるような下肢の歩容を決定することができる。すなわち、身振りや手振りなど上半身主導の感情表現動作のために失われた姿勢安定性を、腰の水平位置で定義される下肢の歩容によって好適に補償若しくは回復させることができる、という訳である。

【0110】[追補]以上、特定の実施例を参照しながら、本発明について詳解してきた。しかしながら、本発明の要旨を逸脱しない範囲で当業者が該実施例の修正や代用を成し得ることは自明である。

【0111】本明細書中では、ロボットの体幹ピッチ軸5と、体幹ロール軸6と、体幹ヨー軸7という3自由度をロボットの腰部の姿勢（ $\theta_{hx}$ 、 $\theta_{hy}$ 、 $\theta_{hz}$ ）として扱ったが、腰部の位置は人間型ロボット100と現実のヒトやサルなどの2足直立歩行動物の身体メカニズムとの対比により柔軟に解釈されたい。

【0112】また、本発明の要旨は、必ずしも「ロボット」と称される製品には限定されない。すなわち、電氣的若しくは磁氣的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置であるならば、例えば玩具等のような他の産業分野に属する製品であっても、同様に本発明を適用することができる。

【0113】要するに、例示という形態で本発明を開示してきたのであり、限定的に解釈されるべきではない。本発明の要旨を判断するためには、冒頭に記載した特許請求の範囲の欄を参照すべきである。

【0114】参考のため、人間型ロボットの関節モデル構成を図9に図解しておく。同図に示す例では、肩関節5から上腕3、肘関節6、前腕4、手首関節7及び手部8からなる部分を「上肢部」17と呼ぶ。また、肩関節5から体幹関節10までの範囲を「体幹部」9と呼び、ヒトの胴体に相当する。また、股関節11から体幹関節



10までの範囲を「腰部」18と呼ぶ。体幹関節10は、ヒトの背骨が持つ自由度を表現する作用を有する。また、股関節11より下の大腿部12、膝関節14、下腿部13、足首関節15及び足部16からなる部分を「下肢部」19と呼ぶ。一般には、体幹関節10より上方を「上体（又は上半身）」と呼び、それより下方を「下体（又は下半身）」と呼ぶ。

【0115】また、図10には、人間型ロボットの他の関節モデル構成を図解している。同図に示す例は、体幹関節10を有しない点で図9に示した例とは相違する。各部の名称については図を参照されたい。背骨に相当する体幹関節が省略される結果として人間型ロボットの上体の動きは表現力を失う。但し、危険作業やなお作業の代行など、産業目的の人間型ロボットの場合、上体の動きを要しない場合がある。なお、図9及び図10で用いた参照番号は、それ以外の図面とは一致しない点を理解されたい。

【0116】

【発明の効果】以上詳記したように、本発明によれば、生体のメカニズムや動作を模した構造を有するリアリ

スティックなロボットに好適に適用される、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することができる。

【0117】また、本発明によれば、例えばヒトやサルなどの直立歩行型の身体メカニズムや動作を模した構造を有する脚式移動型ロボットに好適に適用される、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することができる。

【0118】また、本発明によれば、2足直立歩行による脚式移動を行うとともに脚部の上には胴体や頭部、腕などのいわゆる上半身が搭載されてなる直立歩行・脚式移動型ロボットに好適に適用される、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することができる。

【0119】また、本発明によれば、ヒトに近い自然な動作や豊かな表現力を維持しながら安定歩行を実現するロボットに好適に適用される、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することができる。

【0120】また、本発明によれば、2足直立歩行による脚式移動を行うとともに脚部の上には胴体や頭部、腕などのいわゆる上半身が搭載されてなるロボットにおいて、身振りや手振りなど上半身主導の感情表現動作のために失われた姿勢安定性を補償若しくは回復させることができる、優れた歩行制御装置及び歩行制御方法を提供することができる。

【0121】本発明に係る2足直立歩行型のロボットは、任意の足部運動パターン、ZMP軌道、体幹運動パターン、上肢運動パターン等に基づいて、安定歩行を可能とする腰部運動パターンを生成して、体幹部以下（あるいは腰部以下）すなわち下半身の安定した運動パターンを生成するようになっている。したがって、身振りや手振りなど上半身主導の感情表現動作のために失われた

姿勢安定性を、下半身の運動によって好適に補償若しくは回復させることができる。

【0122】片足が6個の関節自由度を持つ2足歩行型ロボットの場合、各足部の位置と腰部の高さで脚の姿勢が一意に定まるので、腰部運動パターンを生成することは、脚の姿勢すなわち下肢の「歩容」を決定することを意味する。したがって、本発明に係る歩行制御装置及び歩行制御方法によれば、上半身の歩容に応じて、安定歩行できるような下半身の歩容を決定することができる訳である。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施に供される人間型ロボット100を前方から眺望した様子を示した図である。

【図2】本発明の実施に供される人間型ロボット100を後方から眺望した様子を示した図である。

【図3】本実施例に係る人間型ロボット100が具備する自由度構成モデルを模式的に示した図である。

【図4】本実施例に係る人間型ロボット100の制御システム構成を模式的に示した図である。

【図5】本実施例に係る歩行制御の計算のために導入される、人間型ロボット100の線形且つ非干渉の多質点近似モデルを示した図である。

【図6】本実施例に係る人間型ロボット100における歩行制御の処理手順を示したフローチャートである。

【図7】本実施例に係るロボット100において安定歩行可能な腰部運動を制御する処理手順の他の例を示したフローチャートである。

【図8】図5に示した多質点モデルの腰部周辺の拡大図である。

【図9】人間型ロボットの関節モデル構成を模式的に示した図である。

【図10】人間型ロボットの関節モデル構成を模式的に示した図である。

【符号の説明】

1…頭部、2…首関節ヨー軸

3…首関節ピッチ軸、4…首関節ロール軸

5…体幹ピッチ軸、6…体幹ロール軸

7…体幹ヨー軸、8…肩関節ピッチ軸

9…肩関節ロール軸、10…上腕ヨー軸

11…肘関節ピッチ軸、12…前腕ヨー軸

13…手首関節ピッチ軸、14…手首関節ロール軸

15…手部、16…股関節ヨー軸

17…股関節ピッチ軸、18…股関節ロール軸

19…膝関節ピッチ軸、20…足首関節ピッチ軸

21…足首関節ロール軸、22…足部

30…頭部ユニット、40…体幹部ユニット

50…腕部ユニット、51…上腕ユニット

52…肘関節ユニット、53…前腕ユニット

60…脚部ユニット、61…大腿部ユニット

62…膝関節ユニット、63…脛部ユニット

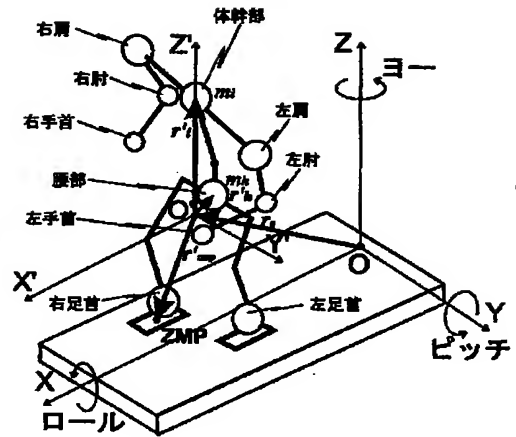
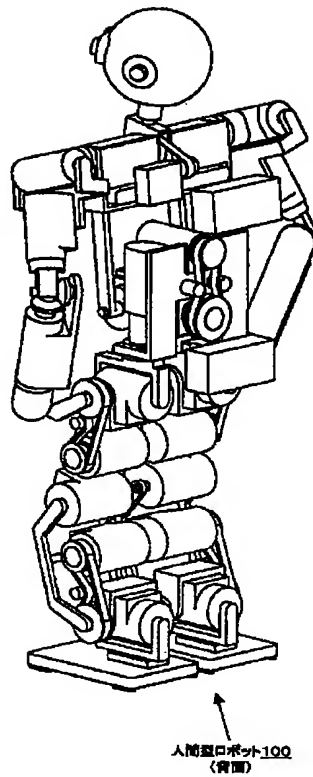
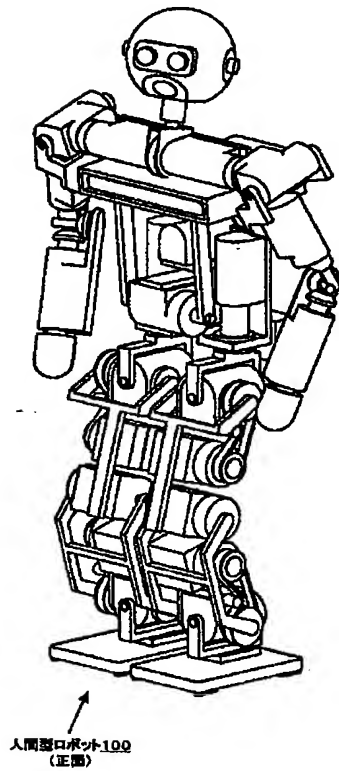
80…制御ユニット, 81…主制御部  
82…周辺回路  
91, 92…接地確認センサ

\* 93…姿勢センサ  
100…人間型ロボット  
\*

【図1】

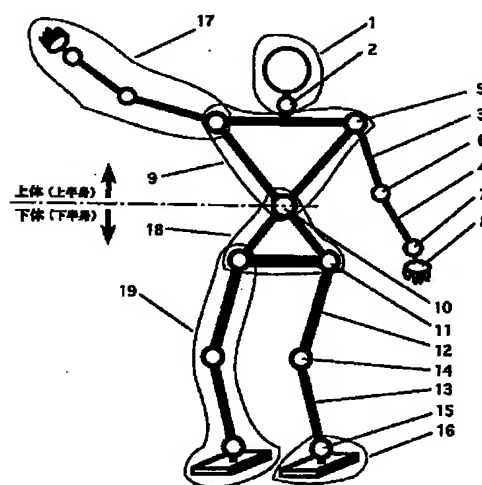
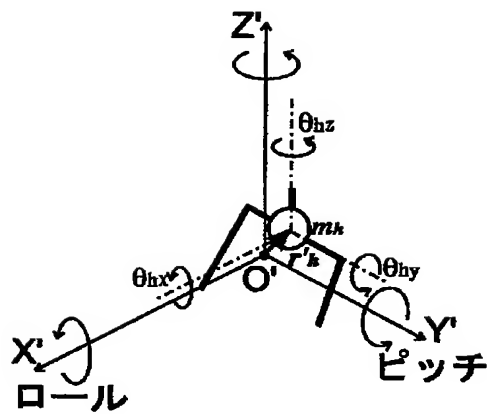
【図2】

【図5】



【図8】

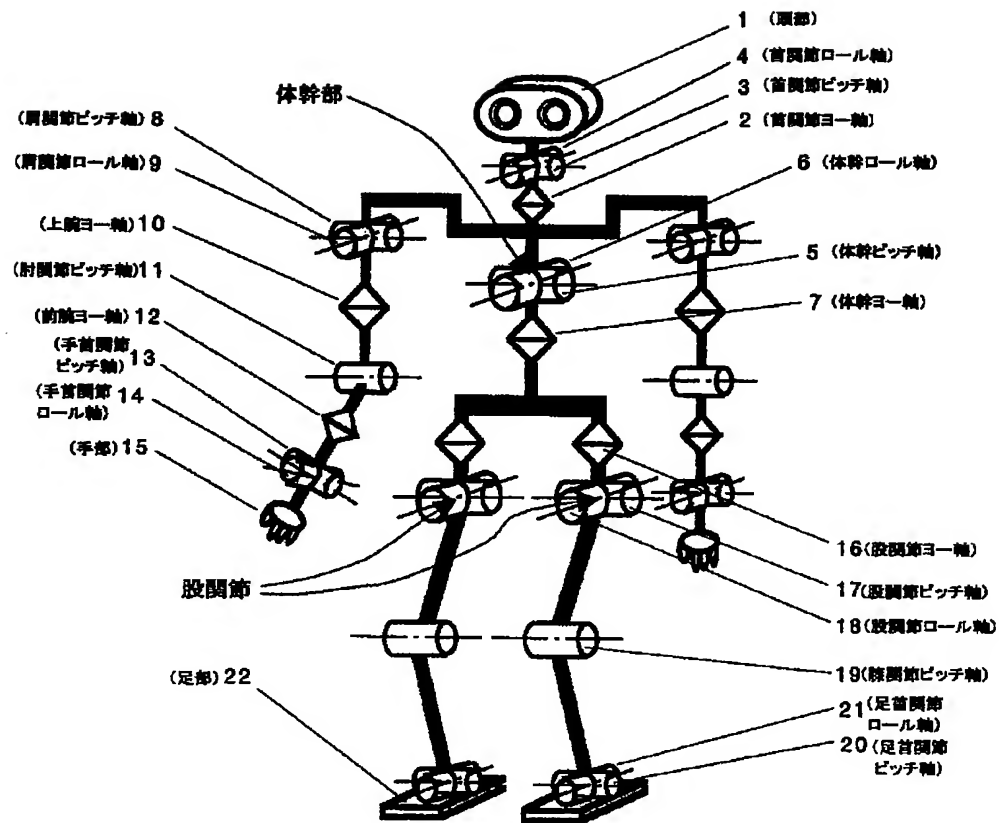
【図9】



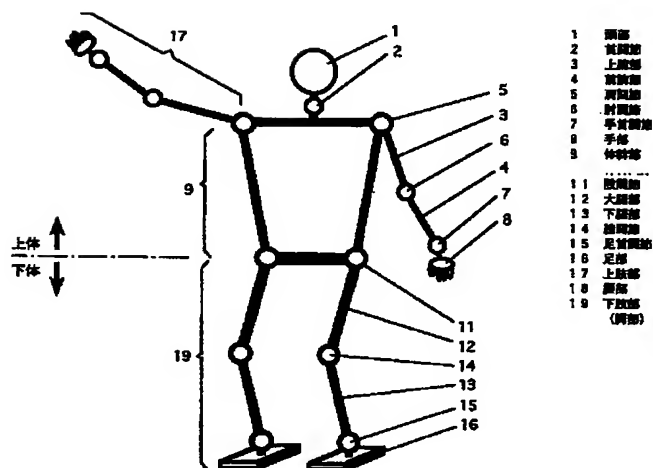
- 1 頭部
- 2 首関節
- 3 上腕部
- 4 前腕部
- 5 腕関節
- 6 肘関節
- 7 平背関節
- 8 手関節
- 9 体幹部
- 10 体幹関節
- 11 股関節
- 12 大腿部
- 13 下腿部
- 14 膝関節
- 15 足首関節
- 16 脚部
- 17 上肢部
- 18 腰部
- 19 下肢部(脚部)



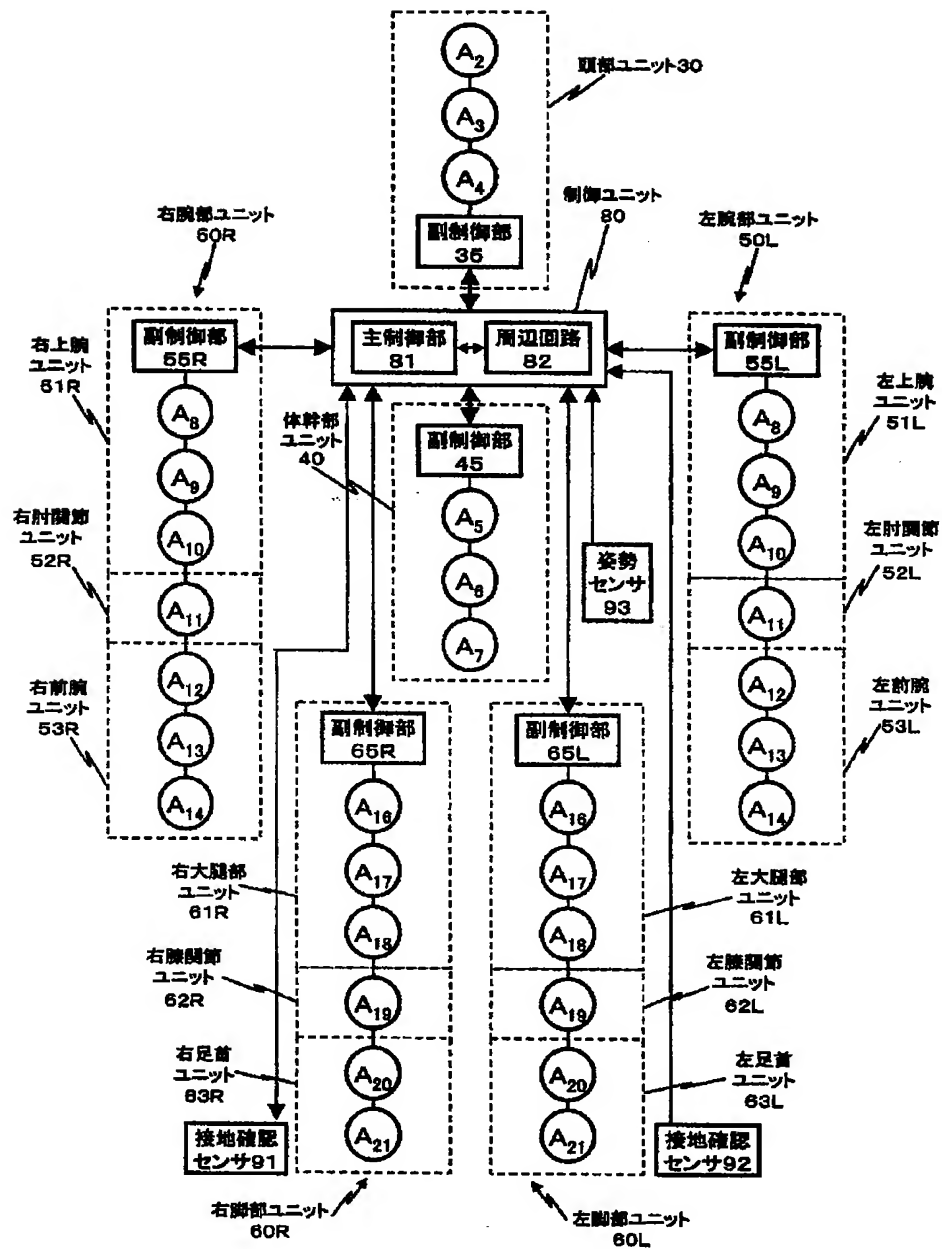
【図3】



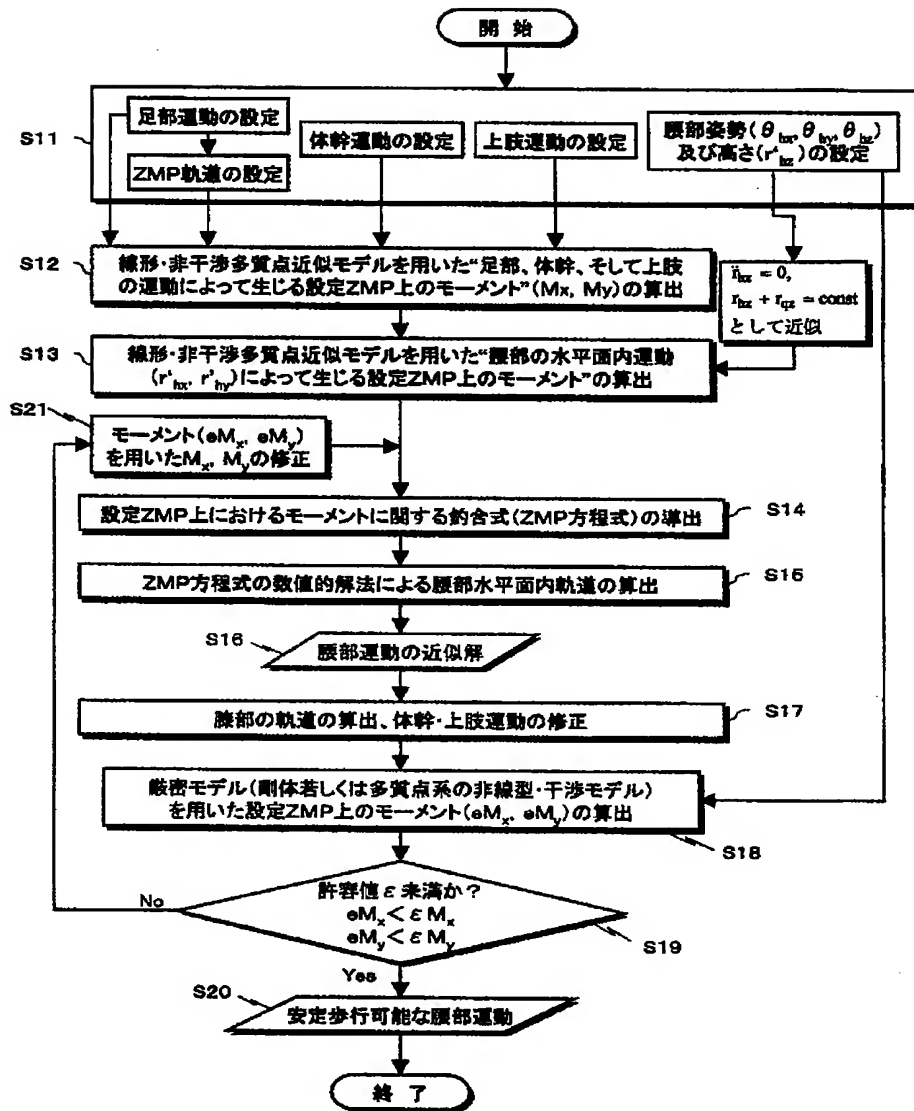
【図10】



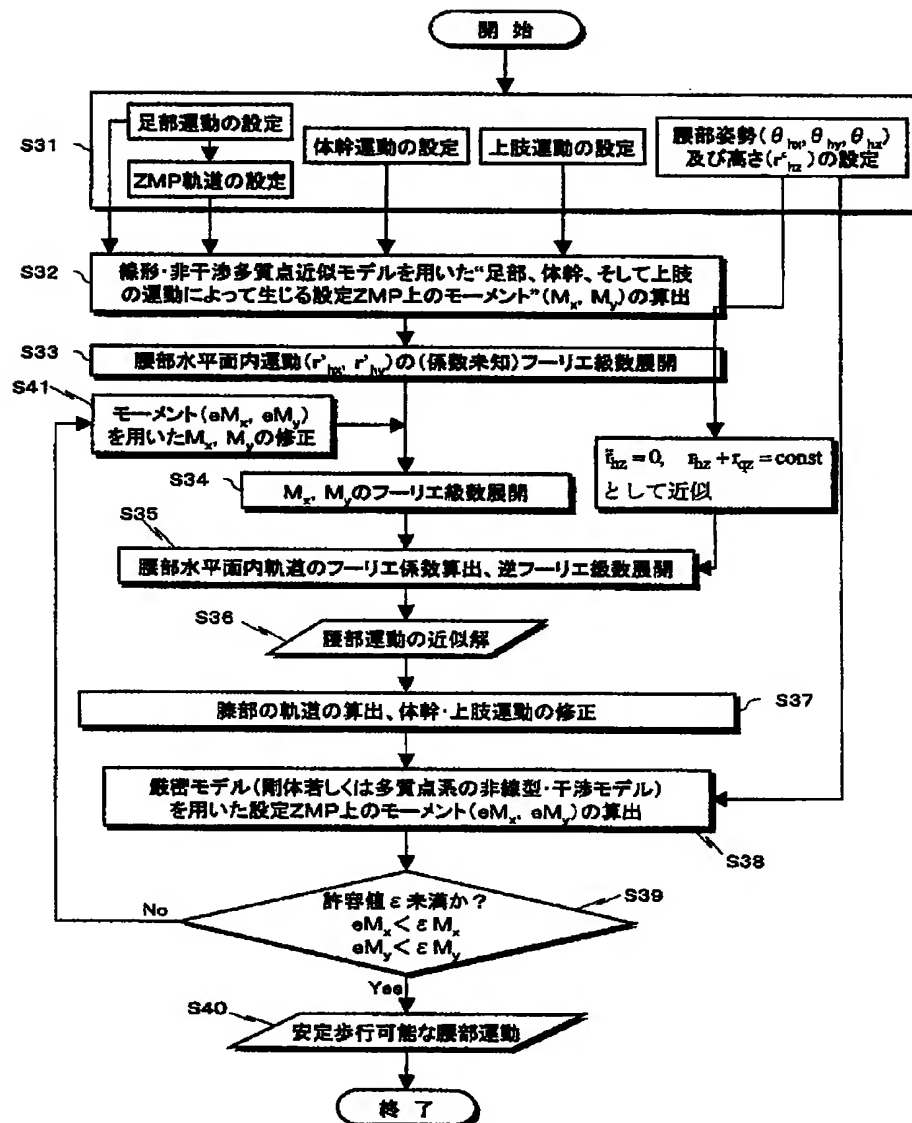
【図4】



【図6】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 山口 仁一

東京都日野市多摩平5-14-38

(58)調査した分野(Int.Cl.<sup>7</sup>, D.B名)

B25J 5/00 - 13/00

A63H 11/00

(56)参考文献 特開 平7-205069(J.P., A)

特開 平11-48170(J.P., A)